Meromixis an Kärntner Seen

Markus REICHMANN, Roswitha FRESNER, Liselotte SCHULZ

Abstract: **Meromixis in Carinthian Lakes**. Meromixis was first described by FINDENEGG in 1935 at Lake Wörthersee as a special feature for Carinthian lakes. In his view, meromictic lakes have a specified amount of nutrients in the depth which are permanently lost for the trophogenic layer due to the lack of full circulation. Recent studies show, that the meromictic stratification even in Carinthian lakes is not as stable as expected.

Key words: Meromixis, meromictic, Monimolimnion, seasonal mixing, stagnation.

Allgemeines zur Zirkulation

Die meisten tieferen Seen unserer Breiten, die einem jahreszeitlichen Temperaturwechsel unterworfen sind, zeigen eine Abfolge von Stagnations- und Zirkulationsphasen.

Beginnt man den Jahreskreis im Sommer, so wird das Gewässer eine warme Oberflächenschicht, das Epilimnion, aufweisen. Durch eine unterschiedlich mächtig ausgeprägte Sprungschicht, dem Metalimnion, mit einem meist steilen Temperaturgradienten wird das Epilimnion vom Hypolimnion, dem kalten Tiefenwasser, getrennt. Das leichte warme Oberflächenwasser liegt über dem schwereren kühlen Tiefenwasser. Das Gewässer befindet sich in der Sommerstagnation.

Mit dem Temperaturabfall im Herbst kühlt das Epilimnion immer weiter ab bis das Gewässer über die gesamte Wassersäule eine Temperaturgleiche (Homothermie) erreicht hat. Infolge dessen gibt es keine temperaturbedingten Dichteunterschiede mehr, und bereits geringe Luftströmungen können ausreichen, das Gewässer in die herbstliche Zirkulation zu versetzen. Es kommt zum vollständigen Austausch der Wasserkörper, Oberflächenwasser wird in die Tiefe und Tiefenwasser an die Oberfläche transportiert.

Mit der winterlichen Kälte nimmt auch die oberflächliche Wassertemperatur weiterhin ab. Wasser das kälter ist als vier Grad Celsius ist aufgrund der Dichteanomalie des Wassers leichter und schwimmt daher oben auf. Diese thermische Schichtung ist nicht so stabil wie jene der Sommerstagnation. Häufig jedoch verhindert auch eine Eisdecke, dass Luftströmungen das Gewässer durchmischen. Ist dies der Fall, so spricht man von Winterstagnation.

Nimmt im Frühjahr die Lufttemperatur wieder zu, so stellt sich neuerlich eine Temperaturgleiche ein, und das Gewässer befindet sich in der Phase der Frühjahreszirkulation.

Gewässer mit Vollzirkulation, bei denen der gesamte Wasserkörper an der Zirkulation teilnimmt, werden als holomiktisch bezeichnet. Im beschriebenen Fall, Seen mit zwei Zirkulationsphasen, spricht man von einem dimiktischen Gewässer. Allgemein unterscheidet man darüber hinaus, nach der Häufigkeit bzw. der Periodizität der Zirkulationen, noch monomiktische Gewässer, oligomiktische Gewässer und polymiktische Gewässer. Bei monomiktischen Gewässern hält die Phase der Vollzirkulation vom Herbst bis zum Frühjahr an (GELLER & HUPPER 2010). Der oligomiktische See durchmischt unregelmäßig, bezogen auf mehrere Jahre. Der polymiktische See ist durch eine häufigere Zirkulation gekennzeichnet. Atelomiktische Gewässer durchmischen häufig nur während nächtlicher Abkühlungsphasen und amiktische Seen zeigen gar keine Zirkulation. Sie sind zumeist chemisch stabil geschichtet.

Meromixis ein Sonderfall der Zirkulation

Eine Sonderform, die in Österreich an Kärntner Seen als erstes beschrieben wurde, ist der meromiktische Zirkulationstyp.

Der Begriff Meromixis (griech.; μέρος-„Teil“, μιχτό-„gemischt, mischbar“) wurde 1935 von Honorarprofessor Dr. Dr. h.c. Ingo Findenegg geprägt. Bereits im Jahre 1927, im Zuge seiner Dissertation zu Turbellarien, erkannte er, dass diese im Sediment des Wörthersees nur bis zu einer gewissen Tiefe vorkommen. Bei genauerer Betrachtung stellte sich heraus, dass der

Denisia **33**,
zugleich Kataloge des oberösterreichischen Landesmuseums
Neue Serie **163** (2014):
129-133

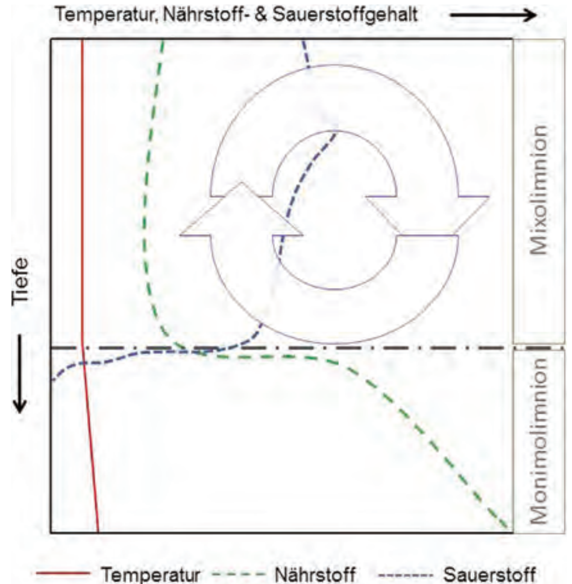


Abb. 1: Schematische Darstellung der Teilzirkulation im meromiktischen See (G. Santner).

Wörthersee ab einer Tiefe von rd. 50 Meter sauerstofffrei war.

Bereits 1933 beschrieb er in seiner Publikation „Alpenseen ohne Vollzirkulation" dieses Phänomen wie folgt: *„Im Laufe des Winters 1931/32 habe ich ziemlich eingehend die Veränderungen in der Wasserschichtung der Kärntner Seen untersucht. Das Ergebnis kann man dahin zusammenfassen, dass die Mehrzahl dieser Seen die bei temperierten Seen zu erwartende Vollzirkulation zu Beginn und am Ende der Winterschichtung nicht erkennen lässt, sondern das Tiefenwasser das ganze Jahr hindurch in dauernder Stagnation verharrt, wodurch es zu einem ungewöhnlich hohen Sauerstoffmangel im tieferen Hypolimnion kommt"*. 1935 publizierte er seine „Limnologischen Untersuchungen im Kärntner Seengebiete". Er stellte fest, dass „ … *einige Kärntner Seen zwar in den oberen Schichten einen oligotrophen Eindruck machen, …, in tieferen Teilen aber ausgesprochen eutrophe Verhältnisse erkennen lassen* …". Er hielt auch fest, dass „ … *die Ausbildung dieser pseudoeutrophen Verhältnisse auf dem Wegfallen der Vollzirkulation zur Zeit geringer thermischer Stabilität am Winteranfang und -ende beruht* …". Er bezeichnete solche Seen mit Dauerstagnation im Tiefenwasser als nur teilweise durchmischbare oder meromiktische Seen. Jene Tiefenwasserschicht, die in dauernder Stagnation verharrt, nannte er Monimolimnion (griech. μονιμος – „dauernd, beständig"). Dem gegenüber steht der durchmischende Wasserkörper, das Mixolimnion (Abb. 1).

Neben dem bereits erwähnten Wörthersee reihte er den Längsee, den Klopeiner See, den Weißensee und den Millstätter See dem meromiktischen Durchmischungstyp zu. Den Grad der Stagnation beschrieb er als proportional zur Windeinwirkung auf den See. Die Ausdehnung des Monimolimnions, bzw. das Verhältnis von stagnierendem zu zirkulierendem Wasserkörper beschreibt er als proportional zur Gewässertiefe.

HUTCHINSON (1937) unterteilt die Meromixis je nach Entstehungsart in ectogene, biogene und crenogene Meromixis. Die ectogene Meromixis wird durch externe Prozesse, wie dem Zustrom schweren, salzhaltigen Wassers, bedingt. Biologische Prozesse, Sedimentation oder Sedimentrücklösungen können eine biogene Meromixis bedingen. Salzhaltige Quellen im See oder der Zustrom von salzhaltigem Grundwasser führen zur crenogenen Meromixis.

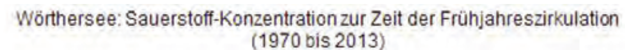
BERGER (1955; in JÖHNK 1998) erkannte, dass die Durchmischung eines Sees, ausgelöst durch den Windschub, stark von der Morphologie, d.h. der Tiefe und der Fläche eines Sees abhängt. Entsprechend berechnete er die maximale Durchmischungstiefe mit

$$D_{max} = \sqrt{\text{Fläche.}}$$

Annäherungsweise kann angenommen werden, dass, wenn ein See tiefer ist als die Berger'sche Durchmischungstiefe D_{max}, das Potential hat, meromiktisch zu sein.

Im Fall des etwa 19 km² großen Wörthersees errechnet sich eine maximale Durchmischungstiefe von rd. 66 Metern. Dieser Wert deckt sich häufig mit der Lage der Sauerstoffgrenze. Für viele andere Seen ist diese „Faustregel" aber nicht zutreffend.

Untersuchungen von LÖFFLER (1972) im Rahmen einer limnologischen Exkursion am Längsee zeigten, dass nicht die fehlende Windeinwirkung sondern die geringe Durchflutung des Gewässers und die stetige Entkalkung der oberen Schichten des hydrogenkarbonatreichen Wassers den meromiktischen Charakter bedingen.



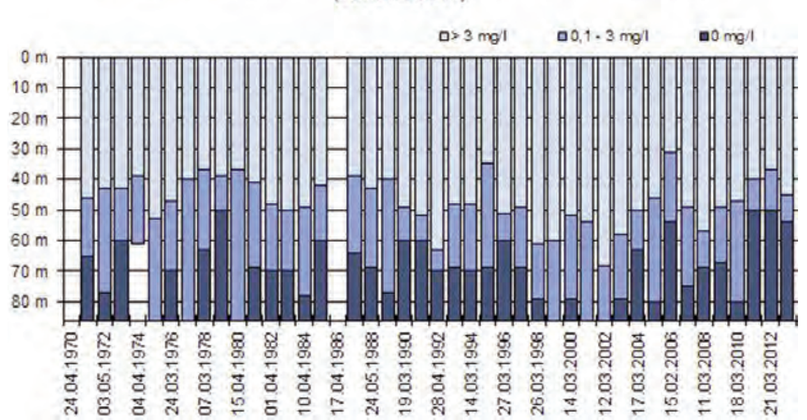


Abb. 2: Sauerstoffprofil zum Zeitpunkt der Phase der Frühjahreszirkulation von 1970 bis 2013.



Abb. 3: Blick auf den meromiktischen Wörthersee. Foto: J. Lorber.

Vollzirkulationen an meromiktischen Seen

Auch wenn per Definition in einem meromiktischen See keine Vollzirkulation stattfindet, so treten doch hydrodynamische Effekte auf, welche zum Austausch innerhalb des Monimolimnions führen oder auch das Mixolimnion erfassen. Insofern ist Meromixis, deren Ausbildung und Existenz, ein höchst dynamischer Prozess, sodass die Kategorie des oligomiktischen Sees, d.h. die Durchmischung in unregelmäßigen Abständen, häufig redundant zum Begriff des meromiktischen Sees ist (Jöhnk 1998).

Wie oben beschrieben, wurde der Wörthersee von Findenegg (1933b) als stabiler meromiktischer See definiert, mit einem Monimolimnion von rund 25 Metern Mächtigkeit. Die routinemäßigen Untersuchungen des Wörthersees (Abb. 2) im Zeitraum 1974 bis 2014 zeigen, dass das Gewässer jedoch nur „fakultativ meromiktisch" ist. So gab es immer wieder Jahre, in denen im Wörthersee Sauerstoff bis zum Grund gemessen werden konnte, was auf eine vorangegangene Vollzirkulation hindeutet. Die vorliegenden limnologischen Daten des Kärntner Institutes für Seenforschung belegen, dass der Wörthersee im Frühjahr 1975, 1977, 1980, 1999 und im Frühjahr 2001 eine Vollzirkulation vollzogen hat (Abb. 2). Am Ende der Frühjahrszirkulation wurden über Grund Sauerstoffkonzentrationen über 0,5 mg/l nachgewiesen (Schulz et al. 2005, Schulz et al 2011).

Inwieweit Veränderungen im meromiktischen Zirkulationsverhalten als Folge des Klimawandels angesehen werden können, wurde versucht innerhalb des Projektes SILMAS – „Sustainable Instruments for Lakes Management in the Alpine Space" zu klären.

Im Mittelpunkt stand die Frage nach den Auswirkungen der klimabedingten Erwärmung auf den Temperaturhaushalt und das Zirkulationsverhalten meromiktischer Seen. In den vergangenen Jahrzehnten wurde ein Anstieg der Wassertemperatur an der Seeoberfläche im Mittel von rund 0,8 °C an den untersuchten meromiktischen Seen, Wörthersee und Klopeiner See, sowie dem holomiktischen Ossiacher See beobachtet. Weiters wurde im Wörthersee eine Ausdehnung des Mixolimnions festgestellt. Beim Klopeiner See war keine nennenswerte Verschiebung der Grenze zwischen Mixo- und Monimolimnion seit den 1930er Jahren zu erkennen. Reichte die Zirkulation 1932 bis in rd. 32 Meter Tiefe (Findenegg 1933), so liegt die Sauerstoffgrenze aktuell zumeist zwischen 20 und 30 Metern (Schulz et al. 2012).

Unter der Annahme, dass das Monimolimnion beziehungsweise das stagnierende Tiefenwasser von meromiktischen Seen nicht von der Zirkulation erfasst und ausgetauscht wird, müsste das Tiefenwasser deutlich älter sein als das zirkulierende Wasser. Mithilfe der Analyse der Isotopen: Deuterium, Sauerstoff-18 und dem radioaktiven Tritium mit seinem Zerfallsprodukt Helium ging man der Frage nach dem Alter des Tiefenwassers nach (Harum et al 2011). Die Isotopenanalysen

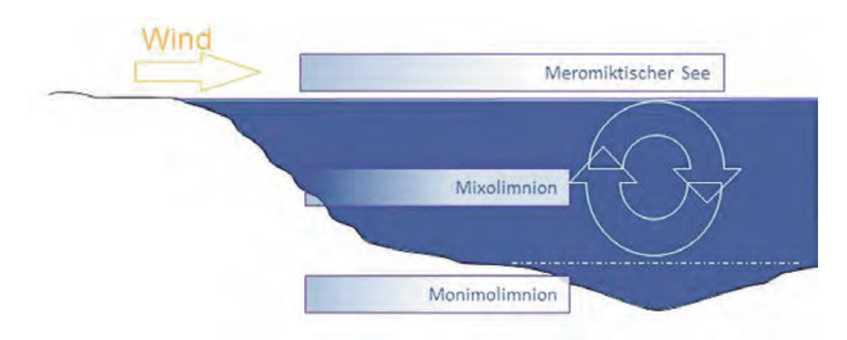


Abb. 4: Schematische Darstellung der Schichtungsverhältnisse im meromiktischen See anhand Temperatur, Sauerstoff und Nährstoff.

zeigten, dass die mittleren Verweilzeiten des Tiefenwassers mit 9,5 Jahren im Wörthersee bzw. 6,8 Jahren im Klopeiner See anzugeben sind. Zum Vergleich beträgt die ermittelte mittlere Aufenthaltsdauer des Tiefenwassers im nicht meromiktischen Ossiacher See nur 1,5 Jahre. Die vorliegenden Ergebnisse belegen, dass es in den meromiktischen Seen, Wörthersee und Klopeiner See, zu einer Erneuerung des Tiefenwassers durch vertikale oder laterale Zirkulation kommt.

Veränderung des Zirkulationsverhaltens meromiktischer Seen und die Folgen für den Stoffkreislauf des Gewässers

Durch den fehlenden Austausch des Tiefenwassers wirkt das Monimolimnion als Sunk für absinkendes organisches Material. Die Abbauprozesse führen zu einer ausgeprägten Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser bis zum völligen Sauerstoffschwund und zu einer Anreicherung gelöster Stoffe im Monimolimnion (Abb. 3). Entsprechend bildet sich an der Grenze zwischen Mixo- und Monimolimnion eine Chemokline aus, wodurch das Monimolimnion noch stabiler wird. Im sauerstofffreien Monimolimnion erfolgt der mikrobielle Abbau organischer Stoffe anaerob, wobei Methan und Schwefelwasserstoff entstehen. Methan wird an die Atmosphäre abgegeben, bzw. teilweise im Wasser verstoffwechselt. Schwefelwasserstoff löst sich sehr leicht und entweicht daher nicht (SCHWOERBEL 1993).

Phosphor, der in den meisten Kärntner Gewässern der limitierende Faktor für die Primärproduktion ist, reichert sich im Monimolimnion an. Jener Teil des partikulären Phosphors, der nicht in der durchlichteten Zone abgebaut und erneut aufgenommen wird, sedimentiert in die Tiefe. Unter aeroben Bedingungen bleibt der Phosphor an die Sedimentteilchen gebunden oder fällt als Eisenphosphat aus. Sinkt die Sauerstoffkonzentration über dem Sediment jedoch unter 10 %, kommt es zur Mobilisierung des Phosphors (SCHWOERBEL 1993). Dies hat zur Folge, dass in meromiktischen Seen im Monimolimnion hohe Phosphorkonzentrationen gemessen werden.

Ein stabiles Monimolimnion führt dazu, dass in der Tiefe angereicherte Nährstoffe nicht wieder in die euphotische Zone kommen und somit dem Stoffkreislauf entzogen sind. Treten an meromiktischen Seen tiefer reichende Zirkulationen oder gar Vollzirkulation auf, findet eine interne Düngung des Gewässers statt. Als Folge der internen Düngung nimmt die Produktion der Algen in der trophogenen Zone zu. Eine hohe Algenbiomasse wiederum wirkt sich negativ auf die Sichttiefe bzw. die Transparenz des Gewässers aus.

Zusammenfassung

Findenegg führte aufgrund von Untersuchungen an Kärntner Seen den Begriff Meromixis in die Fachliteratur ein. Er beobachtete, dass während der Zirkulationsphasen am Beginn und Ende des Winters einige Seen keine Volldurchmischung erfuhren. Temperatur-, Sauerstoff- und Nährstoffverhältnisse in der Tiefe legten den Schluss nahe, dass das Tiefenwasser nicht mit dem zirkulierenden Wasserkörper korrespondiert. Dieser Tiefenwasserbereich, das Monimolimnion, ist sauerstofffrei, nährstoffreich und wegen des fehlenden Austausches mit dem Oberflächenwasser auch deutlich älter als das Oberflächenwasser. Er stellt ein Sammelbecken für Nährstoffe, die mit abgestorbenen tierischen und pflanzlichen Organismen in die Tiefe sinken, dar.

Neuere Untersuchungen zeigen, dass die meromiktischen Schichtungsverhältnisse an Kärntner Seen nicht so stabil sind, wie bislang angenommen. So wurden in den vergangenen Jahrzehnten mehrfach an meromiktischen Seen, wie beispielsweise dem Wörthersee, Vollzirkulationen beobachtet. Im Rahmen des Projektes SILMAS – „Sustainable Instruments for Lakes Management in the Alpine Space" wurde versucht zu klären, ob ein Zusammenhang mit der Klimaänderung besteht. Auswertungen von Wassertemperaturdaten der letzten zwanzig Jahre an den drei untersuchten Seen: Wörthersee, Klopeiner See und Ossiacher See belegen einen Anstieg der Wassertemperatur an der Seeoberfläche im Mittel von rund 0,8 °C. Besonders die Isotopenanalysen entlang der Wassersäule brachten neue Erkenntnisse über das Alter des Tiefenwassers. Es stellte sich heraus, dass das Tiefenwasser des streng geschichteten meromiktischen Klopeiner Sees weniger als 10 Jahre alt ist. Offen bleibt die Frage, ob ausschließlich temperaturbedingte Zirkulationen oder ob andere Prozesse zum Wasseraustausch in der Tiefe beitragen. Es darf aber angenommen werden, dass klimabedingte Änderungen bezüglich milderer winterlicher Temperaturen und eine Verlängerung der Phasen der Homothermie sowie geänderter Luftströmungen ein Auslöser für tieferreichende Zirkulationen im meromiktischen See sind.

Literatur

FINDENEGG I. (1935): Limnologische Untersuchungen im Kärntner Seengebiete. Ein Beitrag zur Kenntnis des Stoffhaushaltes in Alpenseen. — Internat. Revue der Ges. Hydrobiol. und Hydrogeographie **32** (6): 369-423, Leipzig.

FINDENEGG I. (1933): Alpenseen ohne Vollzirkulation. — Internat. Revue der Ges. Hydrobiol. und Hydrogeographie **28**: 295-311, Leipzig.

GELLER W. & M. HUPPER (2010): Seeökosysteme I: Verbreitung, Entstehung und physikalisch-chemische Struktur von Seen. — In: Handbuch angewandte Limnologie – 29. Erg.Lfg. 5/12, (Hrsg.) WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

HARUM T., LEIS A. & C. RESZLER (2011): Hydrological water balance modelling, isotope investigations of lake circulation and residence time, meromixis and climate change. — In: Climate Change Impacts on Alpine Space. Final Report of EU-project SILMAS. 140-161.

BERGER F. (1955): Die Dichte natürlicher Wässer und die Konzentrationsstabilität in Seen. — In: JÖHNK K.D. (1998), Meromixis aus physikalischer Sicht. In: DGL Tagungsband 1998 (Klagenfurt), (Hrsg.) Deutsche Gesellschaft für Limnologie, 82-96.

LÖFFLER H. (1972): Arbeitsbericht über die limnologische Exkursion 1972 zum Längsee. — Carinthia II **163**/**83**: 331-377, Klagenfurt.

SCHULZ L., FRESNER R., AMBROS M., REICHMANN M., MAIRITSCH M., HOLAREK C., HONSIG-ERLENBURG W., PETUTSCHNIG J., WEISSEL G. & B. HUMMITZSCH (2005): Der Wörthersee – Limnologische Langzeitentwicklung 1970-2002. — (Hrsg.) Kärntner Institut für Seenforschung, 58pp., Klagenfurt.

SCHULZ L., SAMPL H., FRESNER R., REICHMANN M. & G. SANTNER (2011): Zur Limnologie des Wörthersees. — In: Der Wörthersee – Aus HONSIG-ERLENBURG W. & W. PETUTSCHNIG (Hrsg.), Natur und Geschichte., Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten. 55-84, Klagenfurt.

SCHULZ L., SANTNER G., FRESNER R., WINKLER G. & M. SCHÖNHUBER (2012): Climate Change on Meromictic Lakes of Carinthia. — (Hrsg.) Kärntner Institut für Seenforschung, 38pp., Klagenfurt.

SCHWOERBEL J. (1993): Einführung in die Limnologie. — 7. Auflage, (Hrsg.) Gustav Fischer Verlag, 387pp.

Anschriften der Verfasser:

Mag. Markus REICHMANN
Mag. Roswitha FRESNER
Kärntner Institut für Seenforschung
Kirchengasse 43
9020 Klagenfurt am Wörthersee, Austria
E-Mail: markus.reichmann@ktn.gv.at
roswitha.fresner@ktn.gv.at

Dr. Liselotte SCHULZ
Possau 13, 9063 Maia Saal, Austria
E-Mail: liselotte.schulz@aon.at